

PERANCANGAN PENGATURAN SISTEM SUSPENSİ AKTIF PADA MODEL KENDARAAN SETENGAH DENGAN MENGGUNAKAN METODA KONTROL OPTIMAL LQR

Gofar Abdul Muthi, Mahasiswa TE UNDIP, Sumardi, ST.MT, Iwan Setiawan, ST.MT, Staf Pengajar TE UNDIP.

ABSTRAK

Sistem suspensi yang baik harus dapat meningkatkan kenyamanan dan keamanan bagi penumpang dalam berkendara. Dalam usaha meningkatkan kenyamanan dan keamanan penumpang, sistem suspensi harus dapat meminimalkan percepatan vertikal badan kendaraan dan defleksi suspensi sehubungan dengan permukaan jalan yang tak menentu.

Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan sistem suspensi aktif pada model kendaraan setengah dengan menggunakan metoda kontrol optimal Linear Quadratic Regulator (LQR). Perancangan dilakukan dengan menggunakan beberapa harga matriks pembobot peubah keadaan Q yang berbeda. Hasil perancangan diuji dengan beberapa model gangguan yang diwakili oleh model sinyal sinus, model sinyal random dan sebuah model yang menggambarkan gundukan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem suspensi aktif dengan pengontrol optimal yang telah dirancang dapat memberikan tingkat kenyamanan dan keamanan yang relatif lebih baik dibandingkan dengan sistem suspensi pasif. Dengan gangguan gundukan, nilai percepatan vertikal badan kendaraan, defleksi suspensi depan dan belakang pada suspensi pasif berturut-turut adalah sebesar 0.576886 m/s^2 , 0.000752968 m dan 0.000336435 m . Pada suspensi aktif, hasil optimal diperoleh dengan $Q = \text{diag}(10^5 \ 10^5 \ 10^5)$, yang memberikan nilai percepatan vertikal badan kendaraan, defleksi suspensi depan dan belakang berturut-turut menjadi sebesar 0.535173 m/s^2 , 0.000492 m dan 0.000266 m . Dengan gangguan sinyal sinus, dan gangguan random sistem suspensi aktif dengan pengontrol optimal yang telah dirancang menghasilkan nilai maksimum percepatan vertikal badan kendaraan dan defleksi suspensi yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem suspensi pasif.

Kata Kunci : Suspensi aktif, Kendaraan setengah, Kontrol optimal, Linear Quadratic Regulator (LQR), Matriks pembobot.

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kenyamanan dan keamanan dalam berkendara tentunya sudah menjadi tuntutan bagi para pengendaranya. Faktor kenyamanan ditentukan oleh percepatan gerak vertikal dari badan kendaraan, semakin kecil gerak vertikal badan kendaraan, maka akan semakin baik pula faktor kenyamanannya. Sedangkan faktor keamanan dipengaruhi oleh daya lekat ban pada permukaan jalan dan defleksi per pada sistem suspensi. Untuk memberikan faktor keamanan yang baik, maka diusahakan agar ban dapat melekat pada permukaan jalan dengan baik dan defleksi per diusahakan sekecil mungkin.

Sistem suspensi pada kendaraan memegang peranan yang sangat penting dalam memperoleh kenyamanan dan keamanan. Selain dapat mempengaruhi kestabilan kendaraan dan daya lekat ban pada jalan, sistem suspensi juga berfungsi untuk mengurangi getaran pada kabin kendaraan yang disebabkan oleh ketidakrataan permukaan jalan.

Pada penelitian ini diajukan suatu perancangan pengaturan sistem suspensi aktif dengan menggunakan Kontrol Optimal Linear Quadratic (LQR), yang akan diterapkan pada model kendaraan setengah. Sistem kontrol optimal adalah sistem yang meminimumkan indeks performansi yang dipilih. Indeks performansi yang dipilih ini sangat menentukan konfigurasi sistem yang akan dikontrol.

B. Pembatasan Masalah

Dalam Tugas Akhir ini diberikan pembatasan-pembatasan sebagai berikut :

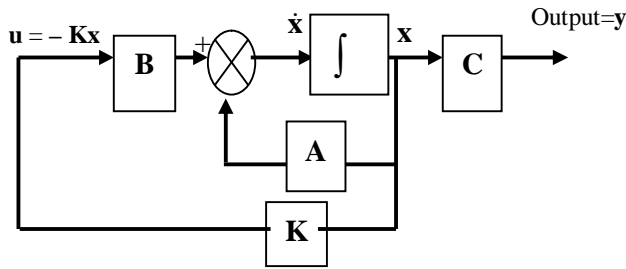
1. Sistem kontrol yang digunakan adalah sistem kontrol optimal Linear Quadratic Regulator (LQR).
2. Metoda yang digunakan untuk meminimalkan indeks performansi kuadratik adalah menggunakan persamaan Riccati.
3. Harga matriks pembobot peubah keadaan Q dan matriks pembobot kendali R ditentukan oleh perancang dengan cara *trial and error*.
4. Harga matriks pembobot kendali R dibuat konstan.
5. Parameter-parameter kendaraan yang diminimalkan meliputi faktor yang mempengaruhi kenyamanan yaitu percepatan gerak vertikal badan kendaraan dan faktor keamanan yaitu defleksi suspensi depan dan belakang.
6. Permukaan jalan mempunyai sifat yang simetris terhadap arah yang melintang sehingga kendaraan dimodelkan sebagai model setengah yang simetris terhadap arah melintang.
7. Kursi penumpang dianggap satu kesatuan dengan massa badan kendaraan (massa *sprung*).
8. Diasumsikan kendaraan bergerak lurus ke depan dengan kecepatan kendaraan yang konstan sebesar 60 km/jam atau sekitar 16,667 m/detik.
9. Gangguan yang ditinjau hanya berasal dari gangguan akibat ketidakrataan permukaan jalan, berupa gangguan gundukan, gangguan sinus, dan gangguan random.
10. Pada gangguan sinus, kecepatan sudut yang digunakan adalah 5 rad/detik sampai 15 rad/detik.
11. Hasil perancangan hanya akan dibandingkan dengan sistem suspensi pasif.

II. DASAR TEORI

A.. Sistem Kontrol Optimal

Sistem kontrol optimal adalah sistem yang meminimumkan indeks performansi yang dipilih. Indeks performansi yang dipilih ini sangat menentukan unjukkerja sistem yang akan dikontrol. Umumnya sistem kontrol akan optimal pada indeks performansi yang diberikan, tetapi tidak optimal lagi pada indeks performansi yang lain.

Adapun bentuk blok diagram kontrol optimal secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Blok diagram sistem kontrol optimal^[12]

Indeks performansi suatu sistem kontrol optimal merupakan suatu fungsi yang harganya menunjukkan seberapa baik unjukkerja sistem sebenarnya mendekati unjukkerja sistem yang diinginkan.

A.1 Sistem Kontrol Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR).

Salah satu metoda yang biasa digunakan untuk meminimalkan indeks performansi adalah Persamaan aljabar Riccati, yang digunakan untuk mengoptimalkan sistem proses yang berbentuk linier.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (2.1)$$

akan dicari matriks K dari vektor kontrol optimal

$$\mathbf{u} = -\mathbf{Kx} \quad (2.2)$$

yang meminimumkan indeks performansi

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Qx} + \mathbf{u}^T \mathbf{Ru}) dt \quad (2.3)$$

dengan \mathbf{Q} adalah matriks simetrik nyata definit positif (atau semi definit positif) dan \mathbf{R} adalah matrik nyata definit positif dan \mathbf{u} adalah vektor kontrol. Suku kedua dari persamaan (2.3) menyatakan kebutuhan energi dari sinyal kontrol. Matriks \mathbf{Q} dan \mathbf{R} menentukan kepentingan relatif dari kesalahan dan kebutuhan energi ini. Jika elemen – elemen matriks \mathbf{K} yang tidak diketahui, ditentukan sedemikian rupa sehingga meminimumkan indeks performansi, maka $\mathbf{u}(t) = -\mathbf{Kx}(t)$ optimal untuk setiap syarat awal $\mathbf{x}(0)$.

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.2) kedalam persamaan (2.1) diperoleh

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} - \mathbf{BKx} = (\mathbf{A} - \mathbf{BK})\mathbf{x} \quad (2.4)$$

kemudian persamaan (2.2) disubstitusikan ke persamaan (2.3) diperoleh

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T (\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{RK}) \mathbf{x}) dt \quad (2.5)$$

berdasarkan teori Liapunov,

$$\mathbf{x}^T (\mathbf{Q} + \mathbf{K}^T \mathbf{RK}) \mathbf{x} = -\frac{d}{dt} (\mathbf{x}^T \mathbf{Px}) \quad (2.6)$$

selanjutnya dengan menurunkan rumus pada persamaan (2.6), didapatkan nilai matriks penguat kontrol umpan balik \mathbf{K} yang optimal untuk indeks performansi yang dipilih sebagai

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (2.7)$$

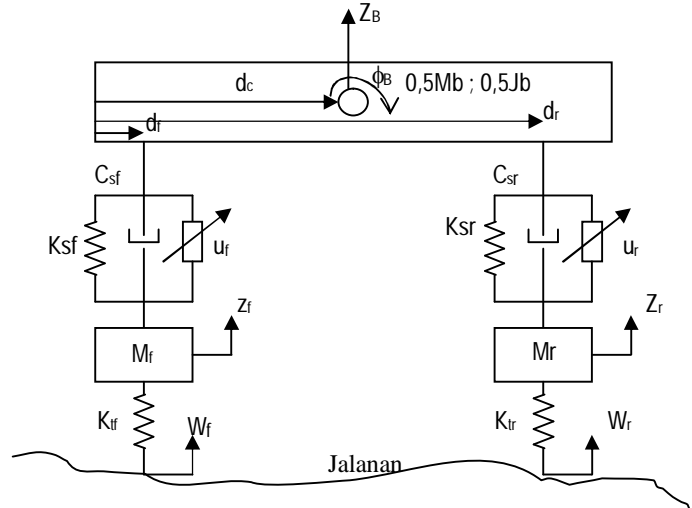
Matriks \mathbf{P} pada persamaan (2.7) harus memenuhi persamaan tereduksi berikut:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{PA} - \mathbf{PBR}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (2.8)$$

B. Sistem Suspensi Aktif

Sistem suspensi aktif adalah suatu sistem yang hanya menggunakan komponen aktif artinya pada sistem suspensi aktif ini tidak digunakan komponen pasif. Karakteristik performansi yang diamati dalam perancangan suspensi kendaraan setengah ini adalah percepatan gerak vertikal badan kendaraan (\ddot{z}_B), defleksi dari suspensi roda depan (x_1) dan defleksi dari suspensi roda belakang (x_2).

Model kendaraan setengah yang digunakan dalam perancangan seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Model kendaraan setengah sistem suspensi aktif

Persamaan sistem suspensi aktif model kendaraan setengah yang digunakan adalah :

$$M_B \ddot{z}_B = F_{sf} + \mu_f + F_{sr} + \mu_r \quad (2.9)$$

$$F_{sf} = K_{sf} [z_f - z_B - (d_c - d_f) \phi_B] + C_{sf} [\dot{z}_f - \dot{z}_B - (d_c - d_f) \dot{\phi}_B] \quad (2.10)$$

$$F_{sr} = K_{sr} [z_r - z_B - (d_c - d_r) \phi_B] + C_{sr} [\dot{z}_r - \dot{z}_B - (d_c - d_r) \dot{\phi}_B] \quad (2.11)$$

$$M_f \ddot{z}_f = -F_{sf} - \mu_f + F_{if} \quad (2.12)$$

$$F_{if} = K_{if} (W_f - z_f) \quad (2.13)$$

$$M_r \ddot{z}_r = -F_{sr} - \mu_r + F_{tr} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$F_{tr} = K_{tr} (W_r - Z_r) \dots\dots\dots (2.15)$$

$$J_B \ddot{\phi} = (d_c - d_f) F_{sf} + (d_c - d_r) F_{sr} \dots\dots\dots (2.16)$$

Pada Tugas Akhir ini, dipilih variabel keadaan :

$$x_1 = z_f - z_B - (d_c - d_f)\phi_B, \quad x_2 = z_r - z_B - (d_c - d_r)\phi_B,$$

$$x_3 = w_f - z_f, \quad x_4 = w_r - z_r,$$

$$x_5 = \dot{z}_f, \quad x_6 = \dot{z}_r, \quad x_7 = \dot{z}_B, \quad x_8 = \dot{\phi}_B$$

dengan menurunkan persamaan-persamaan variabel keadaan diatas maka di peroleh

$$\dot{X} = Ax + Bu + Gw \dots\dots\dots (2.17)$$

dengan $\mu = -K.x$

maka persamaan (2.17) menjadi :

$$\dot{X} = (A - BK).x + Gw \dots\dots\dots (2.18)$$

dengan

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & a_1 & 0 & a_2 & a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_4 & a_5 & a_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_8 & 0 & 0 \\ a_9 & 0 & a_{10} & 0 & a_{11} & 0 & a_{12} & a_{13} \\ 0 & a_{14} & 0 & a_{15} & 0 & a_{16} & a_{17} & a_{18} \\ a_{19} & a_{20} & 0 & 0 & a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{25} & a_{26} & 0 & 0 & a_{27} & a_{28} & a_{29} & a_{30} \end{bmatrix}$$

dimana

$$a_1 = a_4 = 1 \quad a_2 = a_5 = a_7 = a_8 = -1$$

$$a_3 = -(d_c - d_f), a_6 = -(d_c - d_r), a_9 = -\frac{K_{sf}}{M_f}, a_{10} = \frac{K_{sf}}{M_f},$$

$$a_{11} = -\frac{C_{sf}}{M_f}, a_{12} = \frac{C_{sf}}{M_f}, a_{13} = \frac{C_{sf}(d_c - d_f)}{M_f}, a_{14} = -\frac{K_{sr}}{M_r}, a_{15} = \frac{K_{tr}}{M_r}$$

$$a_{16} = \frac{C_{sr}}{M_r}, a_{17} = \frac{C_{sr}}{M_r}, a_{18} = \frac{C_{sr}(d_c - d_r)}{M_r}, a_{19} = \frac{K_{sf}}{M_B}$$

$$a_{20} = \frac{K_{tr}}{M_B}, a_{21} = \frac{C_{sf}}{M_B}, a_{22} = \frac{C_{sr}}{M_B}, a_{23} = -\frac{(C_{sf} + C_{sr})}{M_B},$$

$$a_{24} = \frac{-(C_{sf}(d_c - d_f) + C_{sr}(d_c - d_r))}{M_B}, a_{25} = \frac{K_{sf}(d_c - d_f)}{J_B},$$

$$a_{26} = \frac{K_{sr}(d_c - d_r)}{J_B}, a_{27} = \frac{C_{sf}(d_c - d_f)}{J_B}, a_{28} = \frac{C_{sr}(d_c - d_r)}{J_B},$$

$$a_{29} = \frac{-(C_{sf}(d_c - d_f) + C_{sr}(d_c - d_r))}{J_B}, a_{30} = \frac{-(C_{sf}(d_c - d_f)^2 + C_{sr}(d_c - d_r)^2)}{J_B}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad w = \begin{bmatrix} \dot{w}_f \\ \dot{w}_r \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{M_f} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M_r} \\ \frac{1}{M_B} & \frac{1}{M_B} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_f \\ u_r \end{bmatrix}$$

Spesifikasi data kendaraan yang dipergunakan dalam studi perancangan ini dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Harga Parameter Suspensi

Parameter	Harga	Parameter	Harga
M _B	730 Kg	C _{sf}	1290 Ns/m
J _B	1230 Kg. M ²	C _{sr}	1620 Ns/m
M _f	40 Kg	K _{tf} , K _{tr}	175500 Ns/m
M _r	36 Kg	d _f	0,5 m
K _{sf}	19960 N/m	d _r	3,3 m
K _{sr}	17500 N/m	d _c	1,5 m

III. PERANCANGAN

A. Perancangan Sistem

A1 Indeks Performansi Kuadratis

Parameter yang akan dioptimasi dalam persamaan indeks performansi adalah sebagai berikut :

$$IP = \int_0^{\infty} \left[W_1(\ddot{z}_B)^2 + W_2(z_f - z_B - (d_c - d_f)\phi_B)^2 + W_3(z_r - z_B - (d_c - d_r)\phi_B)^2 + W_4(u_f)^2 + W_5(u_r)^2 \right] dt \dots\dots\dots (3.1)$$

W_{1,2,3,4,5} merupakan konstanta pembobot yang ditentukan oleh perancang. Pada persamaan indeks performansi diatas, (z_f - z_B - (d_c - d_f)φ_B) adalah defleksi ruang suspensi depan, (z_r - z_B - (d_c - d_r)φ_B) adalah defleksi

ruang suspensi belakang, \ddot{z}_B adalah percepatan vertikal badan kendaraan, μ_f dan μ_r masing-masing merupakan sinyal kontrol depan dan belakang

A2 Keluaran Sistem

Keluaran sistem yang terukur adalah :

- Percepatan gerak vertikal badan kendaraan
- Defleksi ruang suspensi depan
- Defleksi ruang suspensi belakang

Keluaran-keluaran tersebut juga merupakan variabel-variabel yang dikontrol serta merupakan parameter-parameter yang akan dioptimasi pada persamaan indeks performansi, maka diperoleh :

$$y = Cx + Du \dots\dots\dots (3.2)$$

Dengan

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad D = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_B} & \frac{1}{M_B} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

dimana

$$c_1 = \frac{K_{sf}}{M_B}, c_2 = \frac{K_{sr}}{M_B}, c_3 = \frac{C_{sf}}{M_B}, c_4 = \frac{C_{sr}}{M_B}, c_5 = \frac{-(C_{sf} + C_{sr})}{M_B},$$

$$c_6 = \frac{(C_{sf}(d_c - d_f) + C_{sr}(d_c - d_r))}{M_B}$$

Sehingga persamaan indeks performansi dapat dituliskan sebagai berikut :

$$J = \int_0^{\infty} (y^T Q y + u^T R u) dt \dots\dots\dots (3.3)$$

dimana Y merupakan vektor keluaran yang dikontrol.

A3 Standardisasi Persamaan Indeks Performansi

Persamaan Indeks performansi di atas mempunyai bentuk yang tidak standar, karena parameter-parameter yang akan dioptimasi dalam persamaan dinyatakan dalam vektor keluaran, y. Oleh karena itu perlu proses standardisasi (modifikasi aljabar) sehingga mempunyai bentuk standar seperti pada persamaan (2.3).

Persamaan indeks peformansi pada persamaan (3.3) di atas dapat dimodifikasi dengan menggunakan persamaan keluaran $Y=Cx+Du$, sehingga suku-suku yang diintegrasikan pada ruas kanan dalam persamaan indeks performansi tersebut menjadi

$$(Cx + D\mu)^T Q (Cx + D\mu) + \mu^T R \mu = x^T Q_m x + 2x^T N \mu + \mu^T R_m \mu \dots\dots\dots(3.4)$$

dengan

$$Q_m = C^T Q C$$

$$R_m = R + D^T Q D$$

$$N = C^T Q D$$

Selanjutnya persamaan (3.4) dapat dituliskan dalam bentuk :

$$x^T Q_m x + 2x^T N \mu + \mu^T R_m \mu = x^T (Q_m - N \cdot R_m^{-1} \cdot N^T)x + (\mu + R_m^{-1} \cdot N^T x)^T R_m (\mu + R_m^{-1} \cdot N^T x) \dots (3.5)$$

misal didefinisikan

$$\mu_1 = (\mu + R_m^{-1} \cdot N^T x)$$

maka persamaan (3.5) menjadi berbentuk

$$x^T (Q_m - N \cdot R_m^{-1} \cdot N^T)x + \mu_1^T R_m \mu_1$$

Sehingga persamaan sistem *state space*-nya menjadi

$$\dot{x} = Ax + B\mu \quad \text{dengan } \mu = \mu_1 - R_m^{-1} \cdot N^T x$$

$$\dot{x} = (A - B R_m^{-1} \cdot N^T) x + B \mu_1 \dots\dots\dots(3.6)$$

$$y = (C - D R_m^{-1} \cdot N^T) x + D \mu_1 \dots\dots\dots(3.7)$$

Persamaan indeks performansi dari sistem *state space* dari persamaan (3.6) menjadi

$$J = \int_0^{\infty} (x^T (Q_m - N R_m^{-1} N^T) x + \mu_1^T R_m \mu_1) dt \dots\dots\dots (3.8)$$

dari persamaan (3.10) tersebut, didapatkan persamaan keadaan yang baru sebagai berikut :

$$\dot{x} = A_n x + B_n u_1 \dots\dots\dots (3.9)$$

$$y = C_n x + D_n u_1 \dots\dots\dots (3.10)$$

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q_s x + u_1^T R_s u_1) dt \dots\dots\dots (3.11)$$

dengan

$$A_n = A - B R_m^{-1} N^T = A - B (R + D^T Q D)^{-1} N^T, B_n = B$$

$$C_n = C - D R_m^{-1} N^T = C - D (R + D^T Q D)^{-1} N^T, D_n = D$$

$$u_1 = u + R_m^{-1} N^T x = u + (R + D^T Q D)^{-1} N^T x$$

$$Q_s = Q_m - N R_m^{-1} N^T = C^T Q C - N (R + D^T Q D)^{-1} N^T, R_s = R + D^T Q D$$

$$N = C^T Q D$$

Dengan menggunakan teori Liapunov dari persamaan keadaan yang baru (persamaan (3.9)), maka diperoleh persamaan Riccati sebagai berikut :

$$A_n^T P_n + P_n A_n - P_n B_n R_n^{-1} B_n^T P_n + Q_s = 0 \dots\dots (3.12)$$

dengan **P_n** merupakan matriks solusi persamaan Riccati untuk sistem baru. Dengan memecahkan

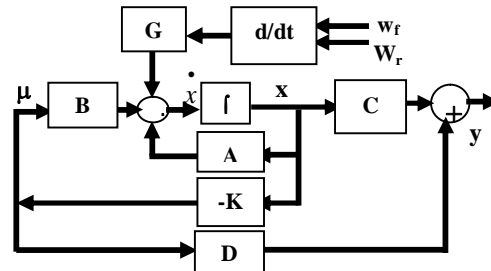
persamaan Riccati tersebut untuk mendapatkan matrik **P_n**, maka dapat dicari matriks penguat kontrol umpan balik **K_n** untuk sistem baru sebagai berikut :

$$K_n = R_n^{-1} B_n^T P_n \dots\dots\dots (3.13)$$

Sedangkan matriks penguatan kontrol umpan balik **K** untuk sistem awal (persamaan 3.4) diperoleh dengan

$$K = K_n + (R + D^T Q D)^{-1} N^T \dots\dots\dots (3.14)$$

Bentuk diagram blok yang dirancang dari dinamika sistem kontrol suspensi yang mendapat gangguan proses dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram blok sistem kontrol suspensi dengan gangguan

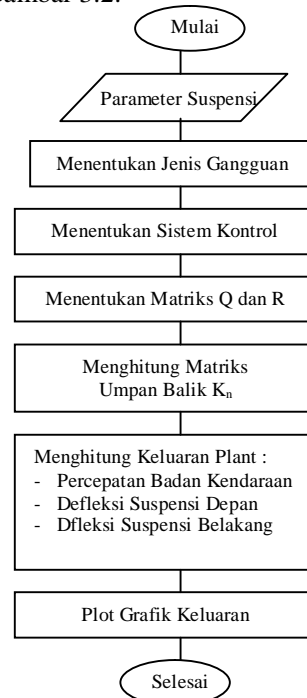
Jika persamaan kontrol $u = -Kx$ di substitusikan ke dalam persamaan dinamika sistem, maka persamaan dinamika sistem loop tertutup menjadi

$$\dot{x} = (A - BK)x + Gw$$

$$y = (C - DK)x \dots\dots\dots (3.15)$$

B. Program Utama

Flowchart program utama pengaturan sistem suspensi aktif dengan menggunakan pengontrol optimal LQR dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Flowchart program utama pengaturan sistem suspensi aktif dengan menggunakan pengontrol optimal LQR

IV. HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan dengan cara memberikan 3 model gangguan yang mensimulasikan gangguan berupa gundukan (*road bump*), jalan bergelombang, dan jalan yang tidak rata. Pembahasan dilakukan terhadap hasil pengaturan sistem suspensi aktif dengan kontrol optimal dengan beberapa harga matriks pembobot Q yaitu :

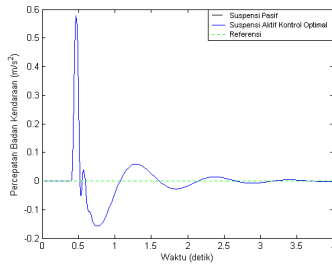
$$Q_1 = \text{diag} (10 \ 10 \ 10); Q_2 = \text{diag} (10^3 \ 10^3 \ 10^3)$$

$$Q_3 = \text{diag} (10^5 \ 10^5 \ 10^5); Q_4 = \text{diag} (10^5 \ 10^6 \ 10^7)$$

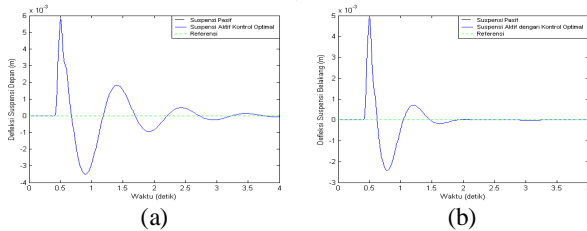
$$Q_5 = \text{diag} (10^5 \ 10^7 \ 10^7)$$

A. Respon Sistem dengan Gangguan Gundukan

A1. Pengujian untuk $Q_1 = \text{diag} (10 \ 10 \ 10)$

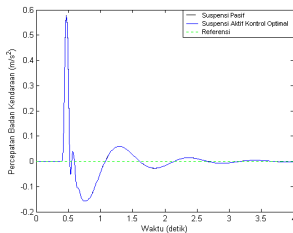


Gambar 4.1 Percepatan badan kendaraan sistem suspensi dengan gangguan gundukan untuk Q_1

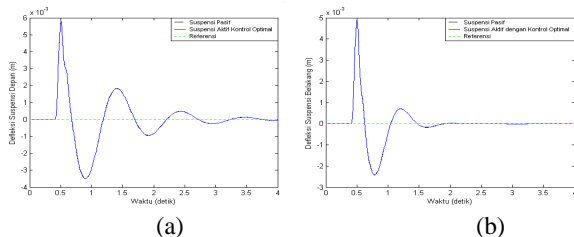


Gambar 4.2 Defleksi suspensi dengan gangguan gundukan untuk Q_1 (a) defleksi suspensi depan (b) defleksi belakang.

A2. Pengujian untuk $Q_2 = \text{diag} (10^3 \ 10^3 \ 10^3)$

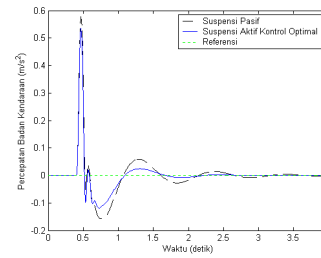


Gambar 4.3 Percepatan badan kendaraan sistem suspensi dengan gangguan gundukan untuk Q_2

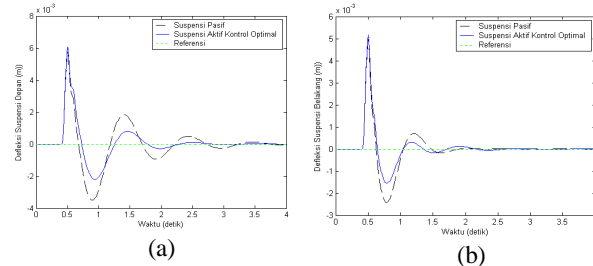


Gambar 4.4 Defleksi suspensi dengan gangguan gundukan untuk Q_2 (a) defleksi suspensi depan (b) defleksi belakang.

A3. Pengujian untuk $Q_3 = \text{diag} (10^5 \ 10^5 \ 10^5)$

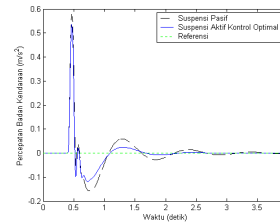


Gambar 4.5 Percepatan badan kendaraan sistem suspensi dengan gangguan gundukan untuk Q_3

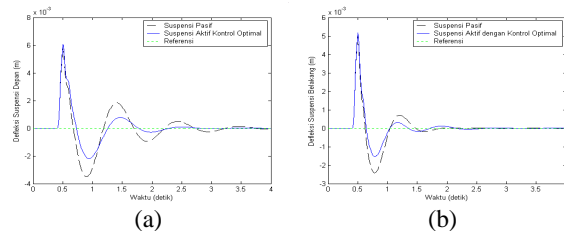


Gambar 4.6 Defleksi suspensi dengan gangguan gundukan untuk Q_3 (a) defleksi suspensi depan (b) defleksi belakang.

A4. Pengujian untuk $Q_4 = \text{diag} (10^5 \ 10^6 \ 10^7)$

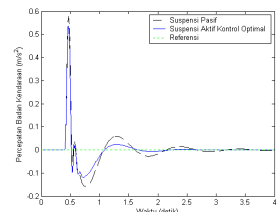


Gambar 4.7 Percepatan badan kendaraan sistem suspensi dengan gangguan gundukan untuk Q_4

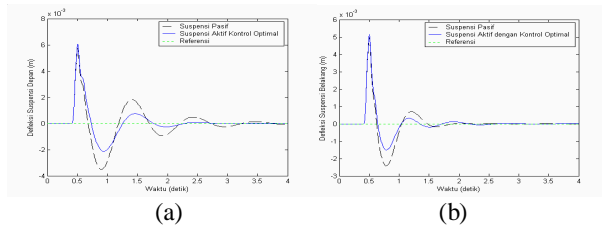


Gambar 4.8 Defleksi suspensi dengan gangguan gundukan untuk Q_4 (a) Defleksi depan (b) Defleksi belakang.

A5. Pengujian untuk $Q_5 = \text{diag} (10^5 \ 10^7 \ 10^7)$



Gambar 4.9 Percepatan badan kendaraan sistem suspensi dengan gangguan gundukan untuk $Q_5 = \text{diag} (10^5 \ 10^7 \ 10^7)$.



Gambar 4.10 Defleksi suspensi dengan gangguan gundukan untuk Q_5 (a) defleksi depan (b) belakang.

Dari hasil pengujian pada beberapa nilai Q diatas terlihat bahwa pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 respon percepatan vertikal badan kendaraan dan defleksi suspensi pada sistem suspensi aktif dengan pengontrol optimal yang telah dirancang untuk nilai Q_1 dan Q_2 berhimpit atau hampir sama dengan respon pada sistem suspensi pasif. Meskipun demikian, sistem suspensi aktif dengan pengontrol optimal yang dirancang menghasilkan nilai maksimum percepatan vertikal badan kendaraan dan nilai rata defleksi suspensi yang lebih kecil dibandingkan dengan suspensi pasif, yang berarti sistem suspensi aktif dengan pengontrol optimal memberikan tingkat kenyamanan dan keamanan yang lebih baik. Hasil dari pengujian dapat dilihat pada Tabel 1 pada lampiran.

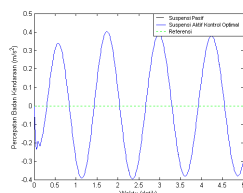
Dalam kenyataannya parameter kendaraan terutama massa badan kendaraan (M_B) sering kali berubah-ubah yang disebabkan oleh perubahan penumpang. Pengaruh perubahan massa kendaraan (M_B) terhadap sistem suspensi pasif dan sistem suspensi aktif dengan pengontrol optimal ditunjukkan pada Tabel 2 pada lampiran.

Dari Tabel 2, dapat dilihat bahwa sistem kontrol optimal yang telah dirancang hanya dapat mentoleransi variasi berupa pengurangan massa badan kendaraan sampai dengan 40% dari nilai nominal, sedangkan untuk variasi berupa penambahan massa badan kendaraan menghasilkan tingkat kenyamanan yang selalu relatif lebih baik bila dibandingkan dengan sistem suspensi pasif.

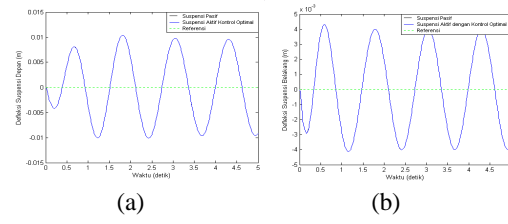
B. Respon Sistem dengan Gangguan Sinus

Sinyal sinus yang digunakan dalam pengujian ini adalah sinyal sinus dengan amplitudo 0,05 m, dan kecepatan sudut (ω) 5; 6,4367; 10; dan 15 rad/s. Pada daerah frekuensi tersebut merupakan daerah frekuensi yang paling terasa pada tubuh manusia.

B1. Pengujian untuk $Q_1 = \text{diag}(10 \ 10 \ 10)$

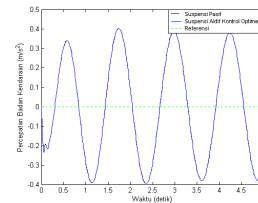


Gambar 4.11 Percepatan badan kendaraan sistem suspensi dengan gangguan sinus kec sudut 5 rad/s untuk Q_1

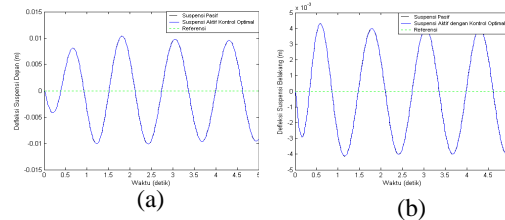


Gambar 4.12 Defleksi suspensi dengan gangguan sinus kec. sudut 5 rad/s untuk Q_1 (a) defleksi depan (b) belakang.

B2. Pengujian untuk $Q_2 = \text{diag}(10^3 \ 10^3 \ 10^3)$

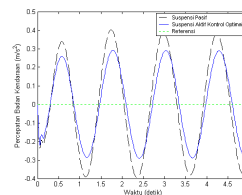


Gambar 4.13 Percepatan badan kendaraan sistem suspensi dengan gangguan sinus kec. sudut 5 rad/s untuk Q_2

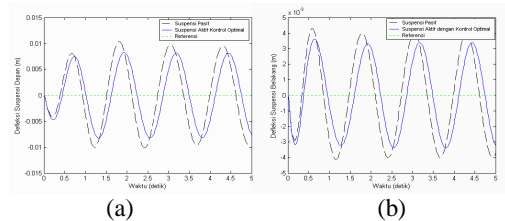


Gambar 4.14 Defleksi suspensi dengan gangguan sinus kec. sudut 5 rad/s (a) defleksi depan (b) belakang.

B3. Pengujian untuk $Q_3 = \text{diag}(10^5 \ 10^5 \ 10^5)$

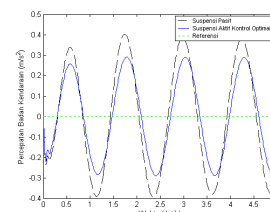


Gambar 4.15 Percepatan badan kendaraan sistem suspensi dengan gangguan sinus kec. sudut 5 rad/s untuk Q_3

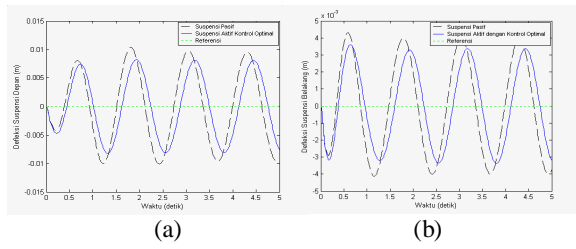


Gambar 4.16 Defleksi suspensi depan dengan gangguan sinus kec. sudut 5 rad/s (a) defleksi depan (b) belakang

B4. Pengujian untuk $Q_4 = \text{diag}(10^5 \ 10^6 \ 10^7)$

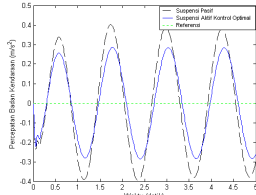


Gambar 4.17 Percepatan badan kendaraan sistem suspensi dengan gangguan sinus Kec. sudut 5 rad/s untuk Q_4

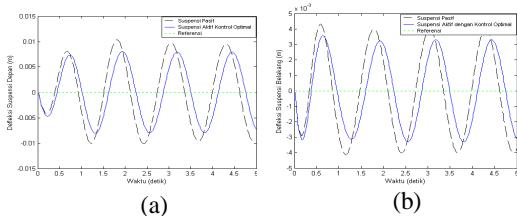


Gambar 18 Defleksi suspensi depan dengan gangguan sinus kec. sudut 5 rad/s Q_4 (a) defleksi depan (b) belakang

B5. Pengujian untuk $Q_5 = \text{diag}(10^5 \ 10^7 \ 10^7)$



Gambar 4.19 Percepatan badan kendaraan sistem suspensi dengan gangguan sinus Kec. sudut 5 rad/s untuk Q_5



Gambar 4.20 Defleksi suspensi depan dengan gangguan sinus kec. sudut 5 rad/s Q_5 (a) defleksi depan (b) belakang

Dari Tabel 3 sampai Tabel 5 pada lampiran, terlihat bahwa sistem suspensi dengan gangguan sinus pada sistem suspensi aktif yang dirancang relatif lebih nyaman dibandingkan dengan suspensi pasif.

C. Respon Sistem dengan Gangguan Random

Grafik respon dari percepatan badan kendaraan dan defleksi suspensi dari masing-masing sistem suspensi yang diberi gangguan random dapat dilihat pada lampiran.

C1. Pengujian untuk $Q_1 = \text{diag}(10 \ 10 \ 10)$

Tabel 4.1 Percepatan Badan Kendaraan dengan Gangguan Random untuk nilai $Q_1 = \text{diag}(10 \ 10 \ 10)$

Suspensi	Nilai Maksimum Percepatan Badan Kendaraan (m/s^2)	
	Suspensi pasif	Suspensi aktif untuk $Q_1 = \text{diag}(10 \ 10 \ 10)$
Percepatan badan kendaraan	1.70581	1.70575

Tabel 4.2 Defleksi Suspensi dengan Gangguan Random untuk nilai $Q_1 = \text{diag}(10 \ 10 \ 10)$

Suspensi	Nilai rata defleksi suspensi (m)	
	Suspensi pasif	Suspensi aktif dengan $Q_1 = \text{diag}(10 \ 10 \ 10)$
depan	0.00722041	0.00722031
belakang	0.00712476	0.00712469

C2. Pengujian untuk $Q_2 = \text{diag}(10^3 \ 10^3 \ 10^3)$

Tabel 4.3 Percepatan Badan Kendaraan dengan Gangguan Random untuk nilai $Q_2 = \text{diag}(10^3 \ 10^3 \ 10^3)$

Suspensi	Nilai Maksimum Percepatan Badan Kendaraan (m/s^2)	
	Suspensi pasif	Suspensi aktif untuk $Q_2 = \text{diag}(10^3 \ 10^3 \ 10^3)$
Percepatan badan kendaraan	1.53081	1.52736

Tabel 4.4 Defleksi Suspensi dengan Gangguan Random untuk nilai $Q_2 = \text{diag}(10^3 \ 10^3 \ 10^3)$

Suspensi	Nilai rata defleksi suspensi (m)	
	Suspensi pasif	Suspensi aktif dengan $Q_2 = \text{diag}(10^3 \ 10^3 \ 10^3)$
depan	0.008897	0.008885
belakang	0.006541	0.006537

C3. Pengujian untuk $Q_3 = \text{diag}(10^5 \ 10^5 \ 10^5)$

Tabel 4.5 Percepatan Badan Kendaraan dengan Gangguan Random untuk nilai $Q_3 = \text{diag}(10^5 \ 10^5 \ 10^5)$

Suspensi	Nilai Maksimum Percepatan Badan Kendaraan (m/s^2)	
	Suspensi pasif	Suspensi aktif untuk $Q_3 = \text{diag}(10^5 \ 10^5 \ 10^5)$
Percepatan badan kendaraan	1.31703	1.0912

Tabel 4.6 Defleksi Suspensi dengan Gangguan Random untuk nilai $Q_3 = \text{diag}(10^5 \ 10^5 \ 10^5)$

Suspensi	Nilai rata defleksi suspensi (m)	
	Suspensi pasif	Suspensi aktif dengan $Q_3 = \text{diag}(10^5 \ 10^5 \ 10^5)$
depan	0.008308	0.007873
belakang	0.007216	0.006977

C4. Pengujian untuk $Q_4 = \text{diag}(10^5 \ 10^6 \ 10^7)$

Tabel 4.7 Percepatan Badan Kendaraan dengan Gangguan Random untuk nilai $Q_4 = \text{diag}(10^5 \ 10^6 \ 10^7)$

Suspensi	Nilai Maksimum Percepatan Badan Kendaraan (m/s^2)	
	Suspensi pasif	Suspensi aktif untuk $Q_4 = \text{diag}(10^5 \ 10^6 \ 10^7)$
Percepatan badan kendaraan	1.8142	1.56959

Tabel 4.8 Defleksi Suspensi dengan Gangguan Random untuk nilai $Q_4 = \text{diag}(10^5 \ 10^6 \ 10^7)$

Suspensi	Nilai rata defleksi suspensi (m)	
	Suspensi pasif	Suspensi aktif dengan $Q_4 = \text{diag}(10^5 \ 10^6 \ 10^7)$
depan	0.011822	0.009950
belakang	0.009374	0.008667

C5. Pengujian untuk $Q_5 = \text{diag}(10^5 \ 10^7 \ 10^7)$

Tabel 4.19 Percepatan Badan Kendaraan dengan Gangguan Random untuk nilai $Q_5 = \text{diag}(10^5 \ 10^7 \ 10^7)$

Suspensi	Nilai Maksimum Percepatan Badan Kendaraan (m/s^2)	
	Suspensi pasif	Suspensi aktif untuk $Q_5 = \text{diag}(10^5 \ 10^7 \ 10^7)$
Percepatan badan kendaraan	1.98449	1.53236

Tabel 4.10 Defleksi Suspensi dengan Gangguan Random untuk nilai $Q_5 = \text{diag}(10^5 \ 10^7 \ 10^7)$

Suspensi	Nilai rata defleksi suspensi (m)	
	Suspensi pasif	Suspensi aktif dengan $Q_5 = \text{diag}(10^5 \ 10^7 \ 10^7)$
depan	0.009443	0.008287
belakang	0.007552	0.007184

Dari Tabel 4.1 sampai Tabel 4.10 terlihat bahwa hasil pengujian untuk beberapa nilai Q pada sistem suspensi aktif dengan pengontrol optimal dapat menghasilkan nilai maksimum percepatan vertikal badan kendaraan dan nilai rata-rata defleksi suspensi depan dan belakang yang lebih kecil, hal ini berarti sistem suspensi aktif memberikan tingkat kenyamanan dan keamanan yang lebih baik dibandingkan dengan sistem suspensi pasif.

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis yang dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Respon suatu sistem pada teknik kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) sangat bergantung pada pemilihan matriks pembobot Q.
2. Pada pengaturan sistem suspensi aktif dengan pengontrol optimal, untuk nilai Q yang kecil, maka respon sistem akan mendekati sistem suspensi pasif.
3. Dengan gangguan gundukan (*road bump*), sistem suspensi aktif dengan pengontrol optimal yang dirancang dapat menghasilkan tingkat kenyamanan dan keamanan yang lebih baik dibandingkan dengan sistem suspensi pasif, yaitu ditunjukkan dengan menghasilkan nilai maksimum percepatan vertikal badan kendaraan dan nilai rata defleksi suspensi yang lebih rendah. Dengan gangguan tersebut, nilai percepatan vertikal badan kendaraan, defleksi suspensi depan dan belakang pada suspensi pasif berturut-turut adalah sebesar 0.576886 m/s^2 , 0.000752968 m dan 0.000336435 m . Pada suspensi aktif, hasil optimal diperoleh dengan $Q = \text{diag}(10^5 \ 10^5 \ 10^5)$, yang memberikan nilai percepatan vertikal badan kendaraan, defleksi suspensi depan dan belakang berturut-turut menjadi sebesar 0.535173 m/s^2 , 0.000492 m , dan 0.000266 m .
4. Sistem kontrol optimal yang telah dirancang hanya dapat mentoleransi variasi berupa pengurangan massa badan kendaraan sampai dengan 40% dari nilai nominal, sedangkan adanya variasi berupa penambahan, massa badan kendaraan menghasilkan tingkat kenyamanan yang selalu relatif lebih baik bila dibandingkan dengan sistem suspensi pasif.
5. Dengan gangguan sinus, sistem suspensi aktif dengan pengontrol optimal yang dirancang dapat menghasilkan nilai percepatan vertikal badan

kendaraan dan defleksi suspensi yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem suspensi pasif.

6. Dengan gangguan random yang mempunyai amplitudo 0,1 m, sistem suspensi aktif dengan pengontrol optimal yang telah diancang mampu menghasilkan tingkat kenyamanan dan keamanan yang relatif lebih baik dibandingkan dengan sistem suspensi pasif.

B. Saran

Untuk penelitian lebih lanjut, perancangan sistem suspensi aktif dengan pengontrol optimal dapat dikembangkan antara lain :

1. Perancangan dapat dilakukan dengan menggunakan filter, untuk mengatasi adanya gangguan non-deterministik
2. Perancangan dilakukan dengan menggunakan model kendaraan penuh sehingga pengaruh gerakan horizontal dan lateral dapat dianalisa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Anderson, Brian D.O dan Moore, John, “*Optimal Control Linear Quadratic Methods*”, Prentice Hall International, Inc. 1989.
- [2]. Basuki, Arief, “Pengaturan Kecepatan Motor DC Secara Real Time Menggunakan Teknik Kontrol Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR)”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Undip, 2004.
- [3]. Hrovat D, “*Optimal Active Suspension Structure for Quarter Car Vehicle Model*”, Automatica, Vol. 26. No. 5, 1987.
- [4]. Hassul, Michael dan Shahian Bahram, “*Control System Design Using Matlab*”, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- [5]. Hartanto, Didik, “Perancangan Pengaturan Sistem Suspensi Semi-Aktif dengan Peredam Nonlinier pada Model Kendaraan Setengah Menggunakan Pengontrol Fuzzy”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Undip, 2003.
- [6]. Kuo, Benjamin C, “Teknik Kontrol Otomatik”, Edisi Bahasa Indonesia, Jilid 1, Prenhallindo, Jakarta, 1995.
- [7]. Moon, S.Y dan Kwon, W.H, “*Genetic-Based Fuzzy Control for Half-Car Active Suspension*”, IEEE Control System Magazine, vol 17.
- [8]. Martinus D, Soenarko B, dan Yunazwin Y , “Aplikasi Teori Kontrol Optimal Pada Sistem Peredam Getar Semi-Aktif Menggunakan Model Kendaraan Setengah”, Seminar Instrumentasi Berbasis Komputer 1996, Jurusan Teknik Fisika, ITB.
- [9]. Ogata, Katsuhiko, “Teknik Kontrol Automatic (Sistem Pengaturan)”, Jilid 1, Erlangga, Jakarta, 1994.
- [10]. Ogata, Katsuhiko, “Teknik Kontrol Automatic”, Jilid 2, Edisi Kedua, Erlangga, Jakarta, 1997.
- [11]. Ogata, Katsuhiko, “*Designing Linear Control System With Matlab*”, Prentice Hall, New Jersey, 1994.
- [12]. Setiawan, Iwan “Penentuan Matriks Pembobot Q pada Teori Kontrol Optimal Suatu Studi Kasus Sistem Mekanis”, Tugas Akhir, UGM, 1998.
- [13]. Sumardi, “Perancangan Sistem Suspensi Semi-Aktif Dengan Peredam Nonlinier Menggunakan Pengontrol Fuzzy”, Tesis Magister, ITB, 1998.
- [14]. Setiadi, Soni, “Studi Perancangan Kontrol dan Simulasi Sistem Suspensi Aktif Model Kendaraan Setengah Menggunakan Kontrol Optimal”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Fisika ITB, 1996.
- [15]. Setyobudi, A.D, “Simulasi dan Perancangan Sistem Kontrol Suspensi Semi-Aktif Model Seperempat Kendaraan”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Fisika, ITB, 2001.
- [16]. Wahyu D.H, Thomas dan Prasetyo, Wahyu A, “Analisis dan Desain Sistem Kontrol dengan Matlab”, Andi Offset, Yogyakarta, 2003.

GOFAR ABDUL MUTHI, lahir di Cirebon, 26 Januari 1980. Setelah lulus dari SMUN 1 Cirebon tahun 1999, kemudian melanjutkan kuliah di Jurusan Teknik Elektro UNDIP dengan konsentrasi Teknik Kontrol.
E-mail : g_571@yahoo.com

Semarang, September 2004

Mengetahui/Mengesahkan

Pembimbing I

Pembimbing II

Sumardi, ST.MT
NIP. 132 125 670

Iwan Setiawan ST.MT
NIP. 132 283 183

LAMPIRAN

Tabel 1 Nilai Maksimum percepatan vertikal badan kendaraan dan Defleksi Suspensi Sistem Suspensi dari Hasil Pengujian dengan Gangguan Gundukan.

Susepensi	Suspensi Pasif	Suspensi Aktif dengan Pengontrol Optimal				
		Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅
Percep. badan kendaraan (m/s ²)	0.576886	0.576876	0.575935	0.535173	0.535489	0.53617
Defleksi suspensi Depan (m)	0.000752968	0.000752936	0.000749	0.000492	0.000489	0.000477
Defleksi suspensi belakang (m)	0.000336435	0.000336423	0.000335	0.000266	0.000264	0.000264

Tabel 2 Hasil Variasi Massa Kendaraan dari Sistem Suspensi dengan Gangguan Gundukan

Perubahan M _B (%)	Percepatan Badan Kendaraan Suspensi Pasif (m/s ²)	Percepatan Badan Kendaraan Suspensi Aktif dengan Pengontrol Optimal (m/s ²)				
		Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅
-50	1.0422	1.04214	1.03601	1.07605	1.07684	1.07834
-40	0.898276	0.898237	0.894434	0.88194	0.882639	0.884023
-30	0.788805	0.78878	0.786266	0.750124	0.75071	0.751914
-20	0.702889	0.702871	0.701125	0.657134	0.657613	0.658623
-10	0.633727	0.633714	0.632453	0.58839	0.588778	0.589609
+10	0.529359	0.529352	0.528631	0.492315	0.492575	0.493133
+20	0.48904	0.489034	0.48847	0.4567	0.456918	0.457377
+30	0.45441	0.454405	0.453956	0.42639	0.426576	0.426957
+40	0.424348	0.424344	0.42398	0.400127	0.424348	0.400606
+50	0.398008	0.398005	0.397705	0.377057	0.377197	0.377466
+100	0.303691	0.303689	0.303559	0.293039	0.293119	0.293249
+200	0.205988	0.205987	0.205947	0.202341	0.202377	0.202425
+300	0.155834	0.155833	0.155816	0.154204	0.154223	0.15425
+400	0.125317	0.125317	0.125308	0.124456	0.124468	0.124489
+500	0.104793	0.104793	0.104788	0.104286	0.104793	0.104314

Tabel 3 Nilai Maksimum percepatan vertikal badan kendaraan Sistem Suspensi dari Hasil Pengujian dengan Gangguan Sinus.

Kec. Sudut (Rad/s)	Nilai Maksimum Percepatan Badan Kendaraan (m/s ²)					
	Suspensi Pasif	Suspensi Aktif dengan Pengontrol Optimal				
		Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅
5	0.402656	0.402645	0.401489	0.291516	0.290292	0.285614
6,4367	0.704051	0.704008	0.699764	0.44319	0.441208	0.436723
10	0.674112	0.67409	0.671878	0.540368	0.540201	0.54127
15	0.741402	0.741379	0.739159	0.632428	0.633442	0.636414

Tabel 4 Nilai Rata-rata Defleksi Suspensi Depan Sistem Suspensi dari Hasil Pengujian dengan Gangguan Sinus.

Kec. Sudut (Rad/s)	Nilai Rata-rata Defleksi Suspensi Depan (m)					
	Suspensi Pasif	Suspensi Aktif dengan Pengontrol Optimal				
		Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅
5	0.005915	0.005915	0.005911	0.004923	0.004898	0.004801
6,4367	0.010127	0.010127	0.010090	0.007271	0.007236	0.007102
10	0.006953	0.006953	0.006941	0.006115	0.006103	0.006096
15	0.004715	0.004715	0.004713	0.004554	0.004554	0.004555

Tabel 5 Nilai Rata-rata Defleksi Suspensi Belakang Sistem Suspensi dari Hasil Pengujian dengan Gangguan Sinus.

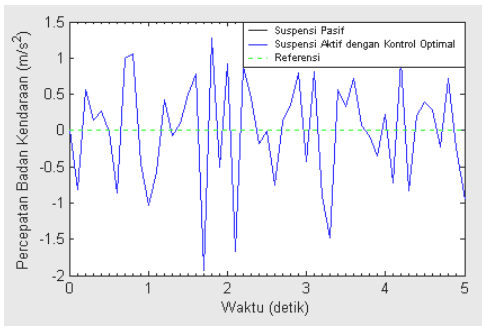
Kec. Sudut (Rad/s)	Nilai Rata-rata Defleksi Suspensi Belakang (m)					
	Suspensi Pasif	Suspensi Aktif dengan Pengontrol Optimal				
		Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅
5	0.002544	0.002544	0.002542	0.002125	0.002114	0.002073
6,4367	0.004347	0.004346	0.004331	0.003107	0.003092	0.003036
10	0.006388	0.006388	0.006378	0.005643	0.005631	0.005626
15	0.004847	0.004847	0.004845	0.004700	0.004700	0.004702

Keterangan ;

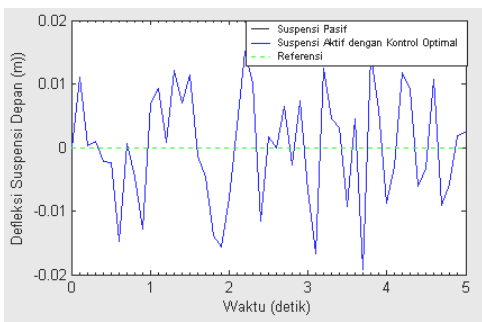
Q₁ = diag (10¹⁰ 10¹⁰ 10¹⁰); Q₂ = diag (10³ 10³ 10³); Q₃ = diag (10⁵ 10⁵ 10⁵);
 Q₄ = diag (10⁵ 10⁶ 10⁷); Q₅ = diag (10⁵ 10⁷ 10⁷)

C. Respon Sistem dengan Gangguan Random

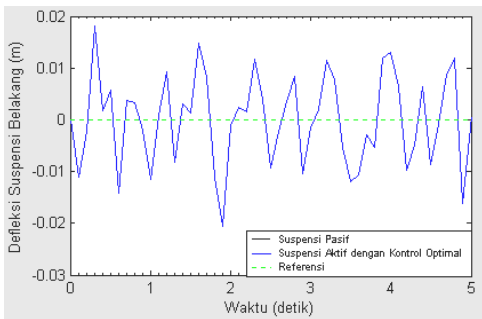
C1. Pengujian untuk $Q_1 = \text{diag}(10 \ 10 \ 10)$



Gambar 1 Grafik percepatan vertikal badan kendaraan dengan gangguan random untuk $Q_1 = \text{diag}(10 \ 10 \ 10)$

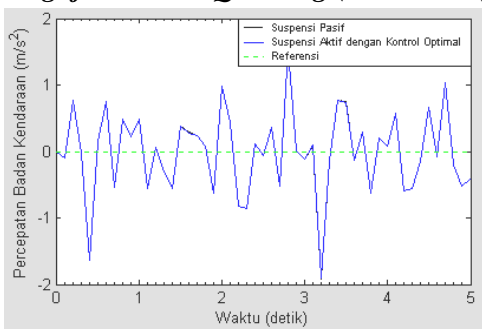


Gambar 2 Defleksi suspensi depan dengan gangguan random untuk $Q_1 = \text{diag}(10 \ 10 \ 10)$

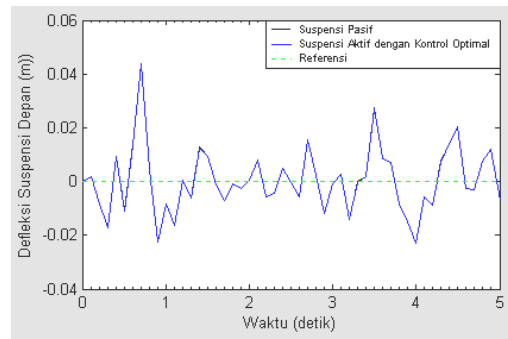


Gambar 3 Defleksi suspensi belakang dengan gangguan random untuk $Q_1 = \text{diag}(10 \ 10 \ 10)$

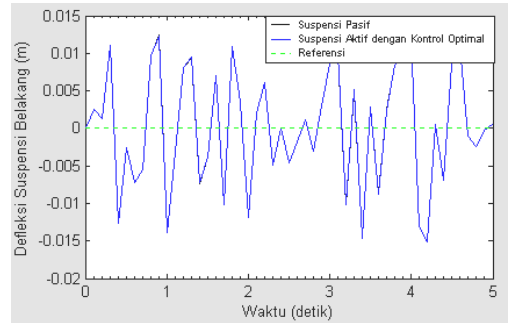
C2. Pengujian untuk $Q_2 = \text{diag}(10^3 \ 10^3 \ 10^3)$



Gambar 4 Grafik percepatan vertikal badan kendaraan dengan gangguan random untuk $Q_2 = \text{diag}(10^3 \ 10^3 \ 10^3)$

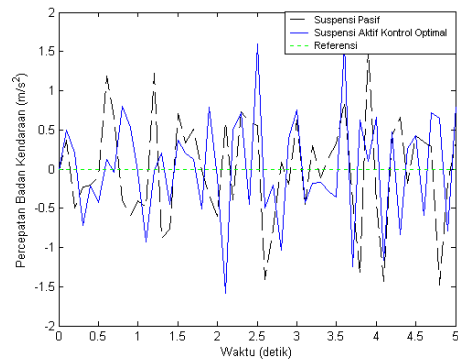


Gambar 5 Defleksi suspensi depan dengan gangguan random untuk $Q_2 = \text{diag}(10^3 \ 10^3 \ 10^3)$

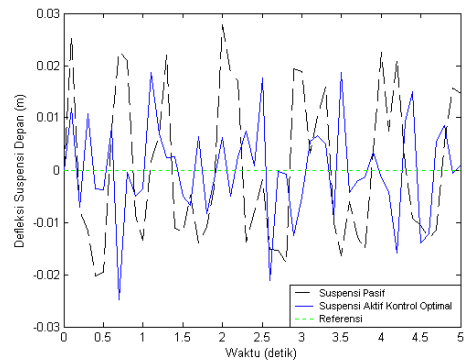


Gambar 6 Defleksi suspensi belakang dengan gangguan random untuk $Q_2 = \text{diag}(10^3 \ 10^3 \ 10^3)$

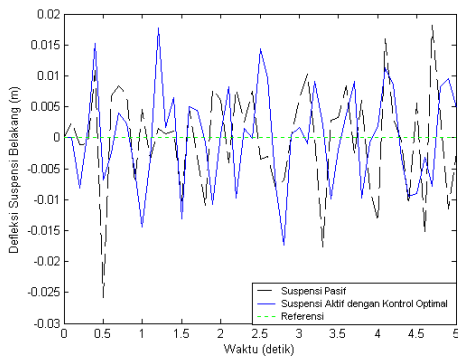
C3. Pengujian untuk $Q_3 = \text{diag}(10^5 \ 10^5 \ 10^5)$



Gambar 7 Grafik percepatan vertikal badan kendaraan dengan gangguan random untuk $Q_3 = \text{diag}(10^5 \ 10^5 \ 10^5)$

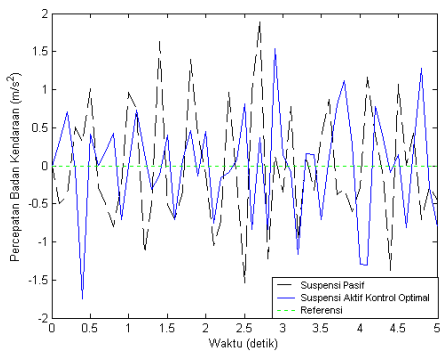


Gambar 8 Defleksi suspensi depan dengan gangguan random untuk $Q_3 = \text{diag}(10^5 \ 10^5 \ 10^5)$

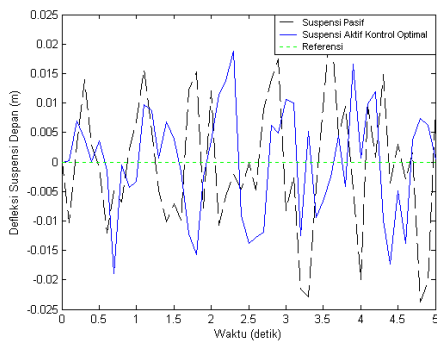


Gambar 9 Defleksi suspensi belakang dengan gangguan random untuk $Q_3 = \text{diag}(10^5 \ 10^5 \ 10^5)$

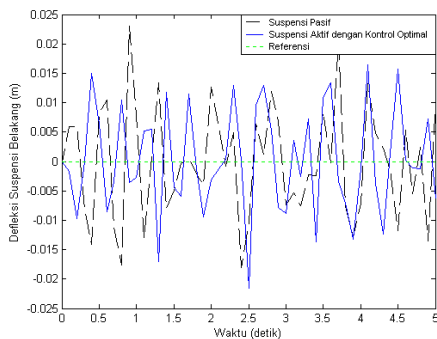
C4. Pengujian untuk $Q_4 = \text{diag}(10^5 \ 10^6 \ 10^7)$



Gambar 10 Grafik percepatan vertikal badan kendaraan dengan gangguan random untuk $Q_4 = \text{diag}(10^5 \ 10^6 \ 10^7)$

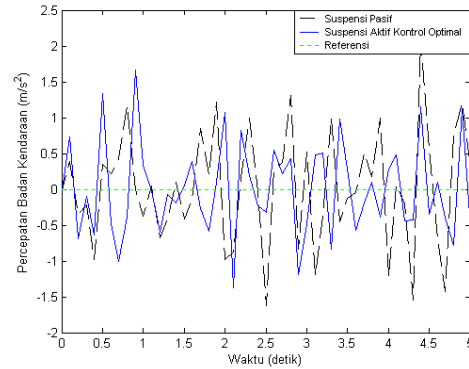


Gambar 11 Defleksi suspensi depan dengan gangguan random untuk $Q_4 = \text{diag}(10^5 \ 10^6 \ 10^7)$

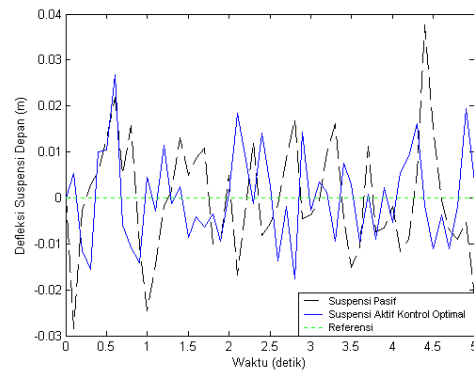


Gambar 12 Defleksi suspensi belakang dengan gangguan random untuk $Q_4 = \text{diag}(10^5 \ 10^6 \ 10^7)$

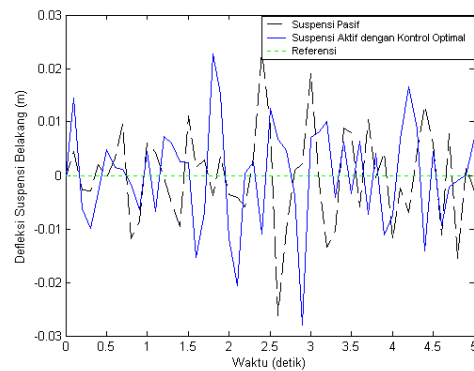
C5. Pengujian untuk $Q_5 = \text{diag}(10^5 \ 10^7 \ 10^7)$



Gambar 13 Grafik percepatan vertikal badan kendaraan dengan gangguan random untuk $Q_5 = \text{diag}(10^5 \ 10^7 \ 10^7)$



Gambar 14 Defleksi suspensi depan dengan gangguan random untuk $Q_5 = \text{diag}(10^5 \ 10^7 \ 10^7)$



Gambar 15 Defleksi suspensi belakang dengan gangguan random untuk $Q_5 = \text{diag}(10^5 \ 10^7 \ 10^7)$